

Optikai és mikrohullámú földmegfigyelési adatok integrációja és agrohidrológiai értékelése

MTA doktori értekezés tézisei

Vekerdy Zoltán

2020. december

1 Motiváció

A térinformatika tudománya az információs technológia fejlődésére alapozva a múlt század hatvanas éveitől fokozatosan alakult ki, Észak-Amerikából indulva, de rohamosan meghódítva a világot. A szélesebb értelemben vett elméleti háttér ugyan sokkal mélyebbre nyúlik vissza az időben, de a térinformatikai adatgyűjtés és -feldolgozás tudományos és technikai fejlődése az elmúlt évtizedekben gyorsult fel igazán.

A hetvenes évek végétől személyes tapasztalatok alapján követhettem nyomon a vízgazdálkodási térinformatika és távérzékelés diszciplínává válását (Vekerdy & Hutyán, 1990). Az egyetemen a hetvenes évek második felében már koordinátarendszereket nyomtató programot készítettünk vetülettan gyakorlaton. Az első földmegfigyelési műholdak felbocsájtásakor még középiskolás voltam, de az egyetemi diplomamunkám (Vekerdy, 1981) írásához már majdnem egy évtizedes műholdhidrológiai szakirodalom állt rendelkezésre. Doktori disszertációmban a térinformatikai és távérzékelési adatokkal támogatva kidolgoztam a Kisalföld geohidrológiai modelljét (Vekerdy, 1996). Érdeklődésem központjában azóta is a műholdas öko- és agrohidrológia témakörei állnak.

Míg kezdetben az adathiány, napjainkban már az adatdömping jelenti a legnagyobb tudományos és gyakorlati kihívást a hidrológiával kapcsolatos térinformatikában. Egyre összetettebb földfelszíni folyamatokat tudunk különböző távérzékelési és in situ módszerekkel térben és időben megmérni valamint fizikai és statisztikai módszerekkel leírni. Az adat és a társadalmi igényeknek megfelelő alkalmazás közti távolság azonban nagy, ami csak megfelelő tudományos alappal hidalható át. A különböző adatok érzékelési és folyamatmodellekben való integrációjának elméleti rendszerezése jelenti napjainkban az egyik legfontosabb térinformatikai kihívást.

Az értekezés az elmúlt tíz évben a térinformatikai adatintegráció terén elért eredményeimet foglalja össze. Szakterületem erősen interdiszciplináris jellegű, így a dolog természeténél fogva sok terület szakembereivel és az egyetemen mesteri és doktori szinten tanuló diákokból álló csapattal dolgozom együtt mindkét munkahelyemen: a gödöllői Szent István Egyetem Mezőgazdasági- és Környezettudományi Karán (SZIE MKK) és a hollandiai Twente University, Faculty of Geo-Information Sciences and Earth Observation (ITC) karán. Az itt bemutatott eredményeim egy része erre a csapatmunkára épít. A közvetlenül hivatkozott publikációinkon felül a téziszfüzet végén felsorolom a témakörben megjelent egyéb publikációinkat is.

2 Bevezetés

A környezetünk megismeréséhez és leírásához szükséges hagyományos, az adatok elaprózódottságát is eredményező (Bozó, 2017) adatgyűjtéshez képest, a tömeges adatgyűjtő és -feldolgozó rendszerek kifejlesztése robbanás szerű adatmennyiség növekedést eredményezett (Szöllősi-Nagy, 2018). Kiemelkedő jelentőségűek ebből a szempontból a műholdas földmegfigyelési rendszerek, amik térben folytonos, időben rendszeresen ismétlődő mérési adatsorokat biztosítanak (Alsdorf & Lettenmaier, 2003), évente petabájt nagyságrendű új adattal növelve a tárolandó és feldolgozandó adatbázisokat. A technikai fejlődéssel a műholdas adatok térbeli és időbeli felbontása növekszik, ezzel is lehetővé téve a felszíni folyamatok pontosabb leírását és mélyebb megértését, de egyúttal hozzájárulva az adatmennyiség növekedéséhez is.

Nemcsak az adatgyűjtésben, hanem az adatfeldolgozásban is robbanásszerű a fejlődés. A nagy tömegben előálló adatok feldolgozását „klasszikus” térinformatikai eszközökkel már nem lehet megoldani, így kialakultak napjaink nagy adatot kezelő, felhő alapú, multidiszciplináris rendszerei. De még ezek is a tér és az idő koordinátáinak explicit kezelésére épülnek. Az adatok és az alkalmazások közötti szintézis interdiszciplináris megközelítést igényel, amit az értekezésemben a tágabb értelemben vett térinformatika szemszögéből tárgyalok.

A műholdas földmegfigyelő rendszerek adatain alapul – többek között – a műholdhidrológia. A napjainkig gyűjtött, negyven évnél is hosszabb idősorok lehetővé teszik a felszín vízkészletváltozásainak nyomon követését. Az értekezésemben tárgyalt műholdas érzékelők a földfelszínről érkező mikrohullámú sugárzást mérik. Adataikat a érzékelési modellekkel alakítjuk át a felhasználó számára értelmezhető geofizikai paraméterekké.

Mind a mai napig nem egyértelmű azonban a műholdas hidrológiai adatgyűjtés tudományos megítélése: az átfogó, térbeli áttekintés előnyeit sokan szembeállítják az in situ mérések pontosságával és időbeli részletességével (v.ö., Famiglietti et al., 2015 és Fekete et al., 2015). A jelen munka ennek a vitának eldöntését nem tűzheti ki céljául, de remélhetőleg sok részlettel hozzá tud járulni a lehetőségek és a korlátok tisztázásához.

A folyamatmodellek közül az agrohidrológiai modellek a víz térbeli eloszlását és annak időbeli változását írják le a talaj-növény-atmoszféra rendszerben. Az alapvető modellezési probléma abban az ellentmondásban rejlik, hogy ezt a nagyon összetett rendszert (a vízforgalom elemeit, a növényi folyamatokat, stb.) a lehető legrészletesebben és legpontosabban, de a gyakorlat számára még alkalmazhatóan, azaz a lehető legkevesebb paraméterrel írjuk le. Az idők folyamán kifejlesztett egyre összetettebb modellek azonban egyre több és egyre sokrétűbb bemenő adatot igényelnek, amit csak különböző forrásokból származó, különböző módszerekkel mért adatok integrációjával lehet biztosítani.

2.1 Célkitűzések

A jelen kutatás általános célja: *Szélsőséges agrohidrológiai helyzetek megbízható területi felmérésére alkalmazható módszerek kifejlesztése optikai és mikrohullámú távérzékelési adatok integrációjával.*

Értekezésem abból az alapvetésből indult ki, hogy az agrohidrológiai folyamatokban a térbeli összefüggések a meghatározók, és ebből a szempontból térbeli adatgyűjtésre és a folyamatok térbeli vizsgálatára épül minden idevágó kutatás. Így a módszerek a térinformatika keretébe illeszkednek, és az adatok agrohidrológiai célú integrációja egy négydimenziós rendszerben valósul meg.

A rész célkitűzéseket az *2-1 táblázat* foglalja össze.

2-1. táblázat A kutatás rész célkitűzései és a kutatási kérdések

	Rész célkitűzés	Kutatási kérdés
RC 1	A tudományos-technikai háttér megalapozása a műholdas agrohidrológia és az adatintegráció rendszerezett áttekintésével.	a) Milyen fizikai kölcsönhatások lépnek fel az agrohidrológiai jelenség és az elektromágneses sugárzás közt? b) Miként számszerűsíthetők a szélsőséges helyzeteket jellemző agrohidrológiai paraméterek? c) Milyen feldolgozottsági szinteken lehet a különböző forrásokból származó adatokat integrálni?
RC 2	A felszíni energiamérlegen alapuló SEBS távérzékelési modell továbbfejlesztésének a bemutatása az aktuális evapotranszspiráció vízstresszes körülmény közötti pontosabb leírására.	a) Miként befolyásolja a vízhiányos állapot a SEBS által meghatározott párolgási paramétereket? b) Melyik modellparaméteren keresztül és miként lehet befolyásolni, hogy a SEBS a párolgást vízstresszes körülmények között is jól adja meg?
RC 3	A párolgás monitoringjának fejlesztéséhez kidolgozott, a mikrohullámú és optikai távérzékelési adatok integrációján alapuló módszer értékelése.	a) Miként lehet a mikrohullámú és az optikai adatokon alapuló paramétereket integrálni? b) Miként változik a párolgásbecslés pontossága az integráció hatására? c) Milyen további adatintegrációs eljárások szükségesek a SEBS nagy térbeli felbontású alkalmazásához?
RC 4	Felhőborítás-független térképezési módszer kidolgozása belvízelöntések nagy időbeli felbontású megfigyelésére radar és optikai műholdadatok segítségével.	a) Mik az optimális előfeldolgozási módszerek a belvíztérképezéshez? b) Miként számszerűsíthető a növényzet hatása a radar-visszaverődésre?
RC 5	A belvíz kialakulásának szimulációja egy kiválasztott teszterületen.	a) Miként számszerűsíthető a beszivárgás dinamikája egy elöntött és egy nem elöntött területen? b) Milyen többletinformációt nyújt a beszivárgási modell és a távérzékelési adatok integrációja?
RC 6	A kifejlesztett módszerek további fejlesztési irányainak és gyakorlati alkalmazhatóságának meghatározása.	a) Mik a technikai háttér fejlődésének irányai és a további tudományos kihívások? b) Miként lehet a módszereket a mezőgazdasági vízgazdálkodási gyakorlatban alkalmazni?

2.2 Az értekezés felépítése

Két szélsőséges agrohidrológiai helyzet műholdadatokkal való vizsgálatát tárgyalom az értekezésben: a vízhiány és a túlzott vízbőség esetét. A két különböző alkalmazási terület közös alapjainak megadása után (az értekezés *2. fejezete*, RC 1-es részcélkitűzés, *2-1 táblázat*) két elkülönülő témakört ismertetek, azok sajátos elméleti háttérével és megoldásaival. (*3. fejezet*, RC 2 és RC 3, valamint *4. fejezet*, RC 4 és RC 5) Mindkét rész önmagában az adat-módszer-eredmény struktúrára épül, és így eleget tesz a kritikai forrásértékelés és módszertani bemutatás feltételeinek. Téziseim a *3. és 4. fejezetekre* épülnek. Végül megvizsgálom, hogy eredményeim – amik sok részletükben az általam irányított kutatókkal való együttműködésre támaszkodnak – miként illeszkednek a nemzetközi és hazai kutatási trendekbe (*5. fejezet*, RC 6).

3 A tudományos eredmények összefoglalása

A kutatás keretében felállítottam az adatintegráció szintjeinek logikai rendszerét. Mindegyik bemutatott adatintegrációs eljárásnál megvizsgáltam, hogy az adatintegrációra melyik szinten kerül sor. Ez a logikai struktúra segítette az integráció megértését, és alkalmazása hozzájárulhat például a térinformatikai szemantikus adatkocák kialakításához, de további módszertani fejlesztést igényel, így önmagában (még) nem fogalmazható meg tudományos tézisként.

Az kutatások során elért eredményeket az alábbi tézisekben foglalom össze.

1. Tézis:

A SEBS modellben alkalmazott, a felszíni energiamérleg számításánál a hőszállítással szembeni ellenállást kifejező kB^{-1} paramétert egy talajnedvességtől függő szigmoid transzformációval pontosítottam. A talajnedvességet mikrohullámú műholdadatok alapján integráltam a modellbe. A módosított SEBS-SM modell ritka sztyepp növényzet felett, vízhiányos körülmények között 40%-os javulást eredményezett a szenzibilis hő számításánál az eredeti modellhez képest. Ez a teljes teszt terület, a Konya-medence területére 30%-os csökkenést eredményezett az aktuális párolgásban. Az eredmény helyességét helyszíni mérések és vízmérlegszámítások bizonyították.

A Surface Energy Balance System, SEBS (Su, 2002) modell egy egyforrású megfigyelési modell, ami távérzékelési adatokat integrál meteorológiai adatokkal a felszín energiamérlegének számításához. A modell megadja a napi aktuális területi párolgás térképét, azonban eredetileg vízhiányos körülmények között alábecsülte a szenzibilis hőáramot, és így túlbecsülte az aktuális párolgást $1-3 \text{ mm nap}^{-1}$ értékkel (Lubczynski & Gurwin, 2005; van der Kwast, Timmermans, Gieske, et al., 2009; Vinukollu, Wood, Ferguson, et al., 2011). Ez abból adódik, hogy a kB^{-1} paraméter meghatározásához alkalmazott lineáris megközelítés a modellben nem pontosan írja le a növényzet állapota és a párolgással szembeni ellenállása közti összefüggést.

Helyszíni Bowen-arány (Bowen, 1926) mérésekkel bizonyítottuk, hogy az eredeti modell vízstresszes esetekben alábecsülte a szenzibilis hő fluxusát, és így túlbecsülte az aktuális párolgást, ami a párologtató rendszer ellenállásának nem megfelelő modellezésével függ össze. A vízstresszes körülmények pontosabb jellemzésére kifejlesztettünk egy módszert (Gokmen, Vekerdy, Verhoef, et al., 2012), ami figyelembe veszi a növények vízellátottságát. Egy szigmoid transzformációs függvénnyel (1. és 2. egyenletek) módosítottuk a modell által számolt kB^{-1} paramétert (3. egyenlet).

A Bowen-arány állomások méréseivel összehasonlítva a SEBS-SM 40%-os javulást eredményezett a szenzibilis hő számításánál a ritka sztyepp növényzet felett (Gokmen, Vekerdy, Verhoef, et al., 2012), ami a medence szintjén 30%-os csökkenést

eredményezett az aktuális párolgásban. Az eredeti és a módosított modellel számított szenzibilis hő és a Bowen-arány állomás méréseinek összehasonlítását mutatja a 3-1. ábra. A transzformációs függvény alkalmazásával a pontok összességében közelebb helyezkednek el az 1:1 egyeneshez, egyenletesebben oszlanak el annak két oldalán, habár vannak még a szürke területre eső, a korrelációt rontó esetek, amik többnyire a ritka sztyepp növényzet felett, kisebb mértékben mezőgazdasági növények felett alakultak ki.

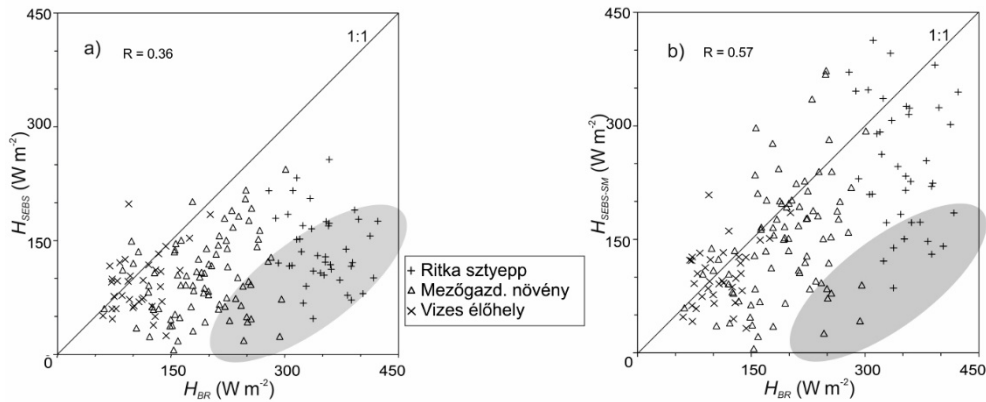
$$SF = a + \frac{1}{1 + e^{b-c*\theta_{rel}}} \quad (1)$$

$$\theta_{rel} = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (2)$$

$$kB_{SM}^{-1} = SF * kB_{SEBS}^{-1} \quad (3)$$

Ahol SF a transzformációs függvény értéke (-); a , b és c a függvény illesztési paraméterei; θ_{rel} a relatív talajnedvesség az effektív hézagterfogat arányában kifejezve ($cm^3 cm^{-3}$); θ az aktuális talajnedvesség ($cm^3 cm^{-3}$); θ_{min} és θ_{max} a minimális és maximális talajnedvesség ($cm^3 cm^{-3}$); kB_{SM}^{-1} és kB_{SEBS}^{-1} a módosított és az eredeti SEBS-szel számolt paraméterek (-).

Egy részletes hatáselemzés alapján megállapítottam, hogy a kB^{-1} paraméter módosítása javította a szenzibilis hőáram – és ebből következően a latens hő és a párolgás számításának pontosságát.



3-1. ábra A Bowen-arányból számolt (H_{BR}) és az eredeti (H_{SEBS}) és a javított modellel ($H_{SEBS-SM}$) meghatározott szenzibilis hőáramok összehasonlítása

A szürkével jelzett területre kevesebb pont esik az a) ábrán, mint a b) ábra azonos területére (Gokmen, Vekerdy, Verhoef, et al., 2012)

2. Tézis

A SEBS-SM megfigyelési modellel végzett területi párolgás számításra alapozva a törökországi Konya-medencében – egy hidrológiai szempontból mérvadó zárt vízgyűjtőn – számszerűsítettem a beszivárgás területi eloszlását. A medence vízmérlege bizonyította a SEBS-SM helyes működését, valamint kimutathatóvá tette a karsztvízszint csökkenésének okait. Ugyanezen számítások az eredeti SEBS modellel hibás eredményre vezettek volna.

A Konya-medence dinamikus vízmérlege alapján ellenőriztük a SEBS-SM modellel készített térképeket (Gokmen, Vekerdy, Lubczynski, et al., 2013). A módszer lényege a területi eloszlást tükröző csapadék és párolgás térképekkel számított lefolyás és beszivárgás, és így a vízmérleg meghatározása évszakos (esős évszak: október 1.–március 31., valamint száraz évszak: április 1.–szeptember 30.) lépésekben. A Konya-medence lefolyástalan (Bayari, Ozyurt, & Kilani, 2009), tehát a vízmérleg a medencére $P - ET = \Delta S$ formában felírható, ahol P a csapadék, ET a tényleges evapotranszpiráció és ΔS a vízkészletváltozást jelöli.

A 2005–2009-es időszakra az összesített vízmérleg -270 mm év^{-1} , azaz évente átlagosan 270 mm-rel több víz párolog el a területről, mint ami csapadékként lehullik. Ez csak a medence vízkészleteinek csökkenésével lehetséges.

A SEBS-SM területi párolgás adatai a felszínalatti vízszintmegfigyelő kutakban meghatározott éves átlagos vízkészletváltozás becsült értékeivel megegyező nagyságúak voltak, míg a SEBS modellel számítottak a megfigyelőkutakból számítotttnál nagyobbak voltak (3-1. táblázat). A különbség azonban nem mindegyik kútban szignifikáns (vö. a „*Max. változás*” és a „ $P + I_s - ET_{SEBS}$ ” oszlopokat a táblázatban), ami a karsztos területen a fajlagos vízhozam meghatározásának bizonytalanságára vezethető vissza.

3-1. táblázat A 2005–2009 időszakra számított átlagos felszínalatti vízkészletváltozások a megfigyelő kutaknál

P – csapadék; I_s – öntözés felszíni vízből; ET – evapotranszpiráció

Kút neve	Vízszint-süllyedés	Min. változás	Max. változás	Csapadék	Öntözés felszíni vízből	Evapotranszspiráció	Evapotranszspiráció *	$P + I_s - ET_{SEBS-SM}$	$P + I_s - ET_{SEBS}$
	Δh	$\Delta S_{h,min}$	$\Delta S_{h,max}$	P	I_s	$ET_{SEBS-SM}$	ET_{SEBS}	$\Delta S_{SEBS-SM}$	ΔS_{SEBS}
	(m év^{-1})	(mm év^{-1})							
Sigircik	-0,75	-75	-150	255	0	482	530	-227	-275
Tutup	-1,56	-156	-312	295	63	650	780	-292	-422
Batum	-2,87	-287	-574	364	63	836	1003	-409	-576
Fethiye	-2,17	-217	-434	349	63	746	895	-334	-483
Gulfet yayla	-1,89	-189	-378	284	63	585	702	-238	-355

* A teljes idősort a SEBS-SM modellel futtattuk, a SEBS modellel egy, a vizsgált időszakot lefedő, reprezentatív, 50 elemű mintából számítottuk.

Az összesített 2005–2009-es vízmérleg alapján a vízgyűjtőre lehullott csapadék mennyiségéhez mért párolgási többlet forrása a felszínalatti vízkészlet. A többletpárolgás az öntözött területeken volt a legnagyobb (kb. 500 mm év⁻¹). A felszíni vízből való öntözés a teljes öntözésnek 20%-át tette ki, a maradék 80%-ot a felszínalatti vízforrásokból termelték ki. Hasonló nagyságrendű többletpárolgás volt kimutatható a medence mélyebb részein elhelyezkedő vizes élőhelyeken és tavakon, ami jelentős felszínalatti hozzáfolyást bizonyít ezeken a területeken.

Bizonyítottam, hogy a SEBS-SM modellel számított vízkészlet dinamika jól írta le a zárt medence vízkészletváltozásait, és így a módszer jól alkalmazható mezőgazdasági és ökológiai szempontú analízisre.

3. Tézis:

Egy termális élezésen alapuló módszerrel különböző, (MODIS, Landsat 8 és Sentinel-2) műholdas szenzorok adatait integráltam nagy felbontású (10 és 30 m) területi párolgási idősorok számítására. A kenyai Naivasha-tó térségének helyszíni adataival összevetve bizonyítottam, hogy a különböző forrásból származó integrált adatsor maximum 15%-os relatív eltérést mutat a referencia adatokhoz képest.

A felszín és a levegő hőmérsékletkülönbsége által meghatározott gradiens pontos ismerete elengedhetetlen a párolgás térbeli eloszlásának térképezéséhez. Az evapotranszspiráció térképezésénél a térbeli felbontás szempontjából a termális infravörös (TIR) sáv(ok) felbontása a meghatározó, amikből a felszín hőmérséklete térképezhető a szenzibilis hőáram számításához. A napi gyakorisággal készülő MODIS Terra és Aqua felvételek termális sávja 1000 m-es, a 16 napos gyakoriságú Landsat 8 felvételek termális sávja(i) 100 m-es felbontásúak. A felszíni hőmérséklet eloszlása egy pixelen belül a felszínborítottság eloszlásától függ, így természetes felszíneknél a növényborítottság, azaz a növény klorofill aktivitásának eloszlását jellemző indexek, pl. NDVI vagy LAI, eloszlásával arányos. A növényzeti indexeket a termális sávok térbeli felbontásánál nagyobb felbontású VNIR sávokból számítják, amik például a Landsat 8 esetében 30 m-es térbeli felbontásúak.

Öntözéshatékonyság monitorozásához szükséges párolgászámításhoz a felszínhőmérséklet és a felszínborítás regresszióján alapuló DisTrad termális élezési (thermal sharpening) algoritmuson (Kustas, Norman, Anderson, et al., 2003) alapuló eljárást fejlesztettük tovább napi gyakoriságú, nagy felbontású párolgási idősorok előállításához a kenyai Naivasha-tó környékén lévő teszterületen.

Az ET térképezés eredményeit a növénykonstanson (K_c tényezőn) alapuló módszerrel ellenőriztük. Mind a 30 m-es (Landsat 8), mind a 10 m-es (Sentinel-2) felbontásra való leskálázás megbízható, a négyzetes átlaghiba négyzetgyöke $RMSE < 1$ mm, azaz 5-6 mm-es napi átlagos párolgás mellett a relatív hiba 15% körüli. Az átlagos abszolút eltérés (MAE) is hasonló nagyságrendű, azaz a módszer pontossága a gyakorlati követelményeknek megfelelő.

A kifejlesztett módszerrel elsőként integráltam a MODIS termális adatokat leskalázással a Landsat 8 és Sentinel-2 műholdfelvételekkel a SEBS-ben való alkalmazásra (Njuki, 2016; Kyalo, 2017).

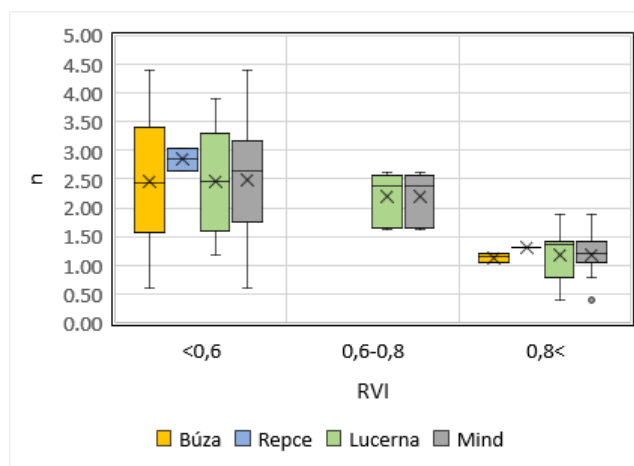
4. Tézis:

Különböző beesési szöggel készült Sentinel-1 radarfelvételeket integráltam nagy időbeli felbontású űrfelvétel idősor létrehozásához. Ehhez három mezőgazdasági növény esetére számszerűsítettem a radar-visszaverődés értékének a beesési szögtől és a növényzet fenológiai állapotától való függését. Kimutattam, hogy a beesési szög normalizálási kitevője a növény fenológiai állapotától függ, és meghatároztam a σ^0 és a növények fenológiai állapotát jellemző RVI index közötti összefüggést.

A beesési szög a kutatásunkban használt Sentinel-1 IWS (Interferometric Wide Swath) felvételek esetében 29.1° – 46.0° között változik egy felvételen belül, ami jelentős hatással van a visszaszórt jelre. A műholdpályák konvergenciája miatt a belvízkutatási tesztterületünkről (a Tápió-Sajó hordalékkúp-síksága) két-két különböző leszálló és felszálló műholdpályáról is készülnek Sentinel-1 felvételek. A geometriai konzisztencia biztosítása érdekében, a jelen kutatói gyakorlatnak megfelelően (pl. Schlaffer, Chini, Giustarini, et al., 2017), csak a két felszálló műholdpályáról (Asc102 és Asc175) készített felvételeket vettük figyelembe, de még így is kb. 9° -os beesési szögekülönbséggel készültek a felvételek a vizsgált mezőgazdasági területekről.

A felvételeken belüli, és a felvételek közötti radiometria konzisztenciát egy közös beesési szögre való normalizálással lehet biztosítani. A normalizálási együttható a beesési szögek koszinuszától és a visszaszóró felület tulajdonságaitól, elsősorban a növényborítottságától függ. Ez utóbbi egy empirikusan meghatározható hatványkitevővel (n) jellemezhető. Olyan esetekre, amikor a visszaszórást a felszínérdesség határozza meg, több szerző is az $n = 2$ értéket alkalmazta (van der Velde, Su, & Ma, 2008; Lievens, Verhoest, De Keyser, et al., 2011), Lambert optikai koszinusz törvényének megfelelően. A gyakorlatban azonban a visszaszóró közeg és felület változatos tulajdonságainak következtében az n szélesebb értékek között változhat, így a tesztterületünkön vizsgált mezőgazdasági növények esetén $1,35 < n < 3,52$ átlagos értékeket vett fel. Ezért megvizsgáltam, hogy milyen hatással van a növényzet a normalizálási hatványkitevőre.

Bemutattam, hogy a vizsgált növények esetében a tesztterületünkön az n értéke nagyobb mértékben függ a növénytakarót jellemző radar vegetációs indextől (RVI-től), mint a növényfajta (3-2. ábra). A normalizáláshoz tehát nincs feltétlenül szükség a növényfajta előzetes ismeretére, a felvételtől közvetlenül számítható radar vegetációs index alapján árnyaltan lehet a normalizálási együtthatót meghatározni. Ehhez meghatároztam az ábrán látható három RVI értéktartományhoz tartozó átlagos n értékeket és ezekkel normalizáltam a Sentinel-1 felvételeket az azokból számított RVI térképek szegmentálásával.



3-2. ábra Az n kitevő eloszlásainak doboz (boxplot) ábrái a radar vegetációs index (RVI) értéktartományai szerint

Mann-Whitney próbával megvizsgáltam, hogy az $n = 2$ kitevővel, vagy az $n = f(RVI)$ módszerrel normalizált adnak-e jobb eredményt. Az eredmény bizonyította, hogy a két normalizálási eljárás p értékei nagyon hasonló eloszlást mutatnak, még ha az $n = f(RVI)$ módszer kicsit jobb eredményt ad, mint az egységes normalizálás, azonban a közöttük levő különbség kicsiny.

5. Tézis:

A HYDRUS-1D kóddal modelleztem a belvízkialakulással kapcsolatos beszivárgási folyamatokat egy belvizes és egy belvízmentes szelvényben. A modellt helyszíni mérési talajnedvesség adatokkal kalibráltam és a beesési szög normalizálásával integrált Sentinel-1 adatsor intenzitás-szegmentálásával készített előntéstérképekkel validáltam. Vízmérlegszámítással bizonyítottam, hogy a távérzékelési adatokkal validált modell megfelelően írja le a beszivárgási folyamatokat, azonban a felszíni összegyülekezés pontos szimulációjához az 1D modellezés nem elegendő.

A folyamatmodellezés és a földmegfigyelési adatok integrációjának első lépéseként a két műholdpályáról (Asc102 és Asc175) készített Sentinel-1 felvételek integrált idősorából intenzitás-szegmentálással előntéstérkép idősort állítottam elő, amit a Landsat 8 és Sentinel-2 felvételekből integrált NDVI idősorral ellenőriztem. A térképek egymáshoz viszonyított általános pontossága (azaz, a mindkét térképen előntésnek osztályozott pixelek száma elosztva az összes előntésnek osztályozott pixelek számával) 0,93. Miután mindkét térkép egy-egy küszöbérték némileg szubjektív megválasztásától függ, és ennek ellenőrzésére pontos helyszíni megfigyelés csak a 11. és 16. tesztáblákról állt rendelkezésre, az általános pontosság csak tájékoztató jelleggel vehető figyelembe. Ez a lépés még önmagában nem tartalmaz tudományos újdonságot, de elengedhetetlen volt a modellezéssel való integrációhoz.

A belvíz kialakulásának és megszűnésének folyamata igen komplex, négydimenziós (X , Y , Z & T) folyamat aminek modellje nehezen paraméterezhető. Kutatásomban ezért egy másik megközelítést alkalmaztam: A folyamatot először a Z és T dimenzióra egyszerűsítve modelleztem a HYDRUS-1D kód segítségével, azt vizsgálva, hogy milyen pontossággal lehet (és kellene) leírni így a folyamatokat, és miként lehet az így nyert adatokat az X , Y , T dimenziókban mértékekkel összevetni.

A beszivárgási és párolgási folyamatokat a talajszelvények mentén leíró dinamikus hidraulikai modelleket állítottunk fel (Khadka, 2019). A 11. tesztábra két szelvényében (M1 – belvizes és M2 – belvízzel nem elöntött) a 2018.09.25.–2018.12.05. közötti időszakra kerültek a modellek kalibrálásra helyszíni talajnedvesség adatokkal és meteorológiai mérésekkel.

A kalibrált modellekkel szimuláltuk a 2016 elején kialakult nedves időszak folyamatait. A belvizes (M1) feltban a modell 2016. január elejétől március közepéig a felszíni rétegek telítettségét mutatta, a felszínen összegyülekező, beszivárogni nem képes elöntéssel. A 40 cm-es mélységbe a felszíni vízterhelés hatása csak két hónapos késéssel, március elejére ért le. Feltűnő azonban, hogy még a felszínen kialakult vízborítás ellenére sem változott a 90 cm-es mélység nedvességtartalma, ami 10%-kal a telítettség alatt volt.

A műholdképek 7 esetben elöntést mutattak, amikor a modell alapján a felszín telített volt, valamint 4 esetben a modellezett telítettséghez közeli állapotban is. Nem volt belvízfolt azonosítható 3 esetben az űrfelvételeken, amiből kettő megegyezik a modellezés eredményével, egy azonban hibás. Ez utóbbi esetben is a visszaverődés értéke az intenzitás-szegmentálás küszöbértékéhez közel volt.

Megállapítható, hogy a modellezés a műholdképekkel alátámaszthatóan trendjében helyesen írta le az elöntések dinamikáját. A valóságban azonban az M1 szelvény egy néhány deciméter mély helyi mélyedésben található, ami nemcsak a helyben keletkezett felszíni vizet, hanem a környező, magasabb területekről hozzáfolyó vizeket is összegyűjti, amit az egydimenziós modellezéssel nem lehet figyelembe venni.

Az M1 modellezett szelvény környékén összegyülekezett belvízfolt Sentinel-1-es felvételekkel és egy drónfelvételen alapuló nagy felbontású magasságmodellel meghatározott térfogatát az M1 és M2 szelvények mentén modellezett beszivárgási és párolgási értékek területi kiterjesztésével számított helyi vízmérleggel ellenőriztük. Az M1 szelvény körüli belvízfolt esetében a modellezés nagyságrendileg helyes, de 20%-kal kisebb belvízmennyiséget adott, mint a műholdkép és egy részletes magasságmodell alapján végzett térfogatbecslés.

Összességében megállapítható, hogy a távérzékelési adatokkal validált modell megfelelően írja le a beszivárgási folyamatokat, azonban a felszíni összegyülekezés pontos szimulációjához az 1D modellezés nem elegendő.

4 Az eredmények alkalmazási lehetőségei

A kutatás eredményei mezőgazdasági és vízgazdálkodási alkalmazásokat támogató térinformatikai adatkockák létrehozását segítik. Így például a Földmegfigyelési Információs Rendszerhez hasonló adatszolgáltatásokban hasznosulhatnak. Az adatok feldolgozási szintjeinek logikai rendszere megalapozza egy szemantikus földmegfigyelési adatkocka létrehozását.

A SEBS-SM modell lehetővé teszi, hogy a területi párolgást az eddigieknél nagyobb pontossággal lehessen meghatározni, így pontosabban lehet a vízhiánnyal sújtott területeket lehatárolni. Ez regionális szinten az aszály megjelenésének azonosítását pontosítja, míg táblaszinten az öntözési igények helyfüggő meghatározását teszi lehetővé, hozzájárulva a precíziós öntözés tervezéséhez. Az előbbire mutat példát az, hogy SEBS-SM modellel számolt párolgásadatok alapján meghatározott vízmérleg eredményeit a Konya-medencében a helyi vízgazdálkodási szervek figyelembe vették a regionális vízkészletek meghatározásánál. Az eljárás hazánk felszín alatti vízkészletváltozásainak elemzésére is alkalmas.

A felszíni hőmérséklet termális élezésen alapuló leiskálázási módszerével további (pl. a jövőben felbocsájtandó) műholdak érzékelőivel mért adatok integrációja is megoldható. Így nagy időbeli felbontású adatkockák hozhatók létre vízgazdálkodási és mezőgazdasági alkalmazások közvetlen támogatására.

A radar-visszaverődés beesési szögtől és felszíni növénytakarótól való függésének ismeretében a különböző pályákról készült úrfelvételek pontosabban integrálhatók. A teljes alkalmazhatóság érdekében azonban az itt bemutatott eredményeket további mezőgazdasági növényre tesztelni kell.

A radar adatsorok belvízmodellezéssel való integrációjának bemutatott módszerei a hazai belvízgazdálkodás optimalizálásához a belvízborítás paramétereinek pontosabb meghatározásával járulnak hozzá.

Az előntések és az aszály nagy felbontású adatsoraiból azok tartóssága levezethető, amivel az okozott károk pontosabban felmérhetők, valamint a megfelelő földhasználat és a szükséges agrotechnológiai beavatkozások tervezhetők.

5 Hivatkozások

- Alsdorf, D. E., & Lettenmaier, D. P. (2003). Tracking fresh water from space. *Science*, 301(September), 1491–1494. Retrieved from <https://science.sciencemag.org/content/301/5639/1491/tab-pdf>
- Bayari, C. S., Ozyurt, N. N., & Kilani, S. (2009). Radiocarbon age distribution of groundwater in the Konya Closed Basin, central Anatolia, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 17(2), 347–365. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0358-2>
- Bowen, I. S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27, 779–787.
- Bozó, L. (2017). A víz és a légköri folyamatok – a hidrológiai ciklus atmoszferikus része. *Magyar Tudomány*, 178, 1198–1205. <https://doi.org/10.1556/2065.178.2017.10.3>
- Famiglietti, J. S., Cazenave, A., Eicker, A., Teager, J. T., Rodell, M., & Velicogna, I. (2015). Satellites provide the big picture. *Science*, 349(6249), 684–685. <https://doi.org/10.1126/science.aac9238>
- Fekete, B. M., Robarts, R. D., Kumagai, M., Nachtnebel, H.-P., Odada, E., & Zhulidov, A. V. (2015). Time for in situ renaissance. *Science*, 349(6249), 685–686. <https://doi.org/10.1126/science.aac7358>
- Gokmen, M., Vekerdy, Z., Lubczynski, M. W., Timmermans, J., Batelaan, O., & Verhoef, W. (2013). Assessing groundwater storage changes using remote sensing-based evapotranspiration and precipitation at a large semiarid basin scale. *Journal of Hydrometeorology*, 14(6), 1733–1753. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0156.1>
- Gokmen, M., Vekerdy, Z., Verhoef, A., Verhoef, W., Batelaan, O., & van der Tol, C. (2012). Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions. *Remote Sensing of Environment*, 121, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.003>
- Khadka, A. (2019). *Integrating remote sensing and infiltration model to analyze the ponding dynamics in Hungary*. University of Twente.
- Kustas, W. P., Norman, J. M., Anderson, M. C., & French, A. N. (2003). Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index–radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 85(4), 429–440. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00036-1)
- Kyalo, D. K. (2017). *Sentinel-2 and MODIS land surface temperature-based evapotranspiration for irrigation efficiency calculations*. University of Twente, Enschede, the Netherlands. Retrieved from http://www.itc.nl/library/papers_2017/msc/wrem/kyalo.pdf
- Lievens, H., Verhoest, N. E. C., De Keyser, E., Vernieuwe, H., Matgen, P., Álvarez-Mozos, J., & De Baets, B. (2011). Effective roughness modelling as a tool for

- soil moisture retrieval from C- and L-band SAR. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 151–162. <https://doi.org/10.5194/hess-15-151-2011>
- Lubczynski, M. W., & Gurwin, J. (2005). Integration of various data sources for transient groundwater modeling with spatio-temporally variable fluxes--Sardon study case, Spain. *Journal of Hydrology*, 306(1–4), 71–96. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.038>
- Njuki, S. M. (2016). *Assessment of Irrigation Performance by Remote Sensing in the Naivasha Basin , Kenya. ITC MSc Thesis*. University of Twente, Enschede, the Netherlands. Retrieved from http://www.itc.nl/library/papers_2016/msc/wrem/njuki.pdf
- Schlaffer, S., Chini, M., Giustarini, L., & Matgen, P. (2017). Probabilistic mapping of flood-induced backscatter changes in SAR time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 56, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.12.003>
- Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85–100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>
- Szöllősi-Nagy, A. (2018). Sorsfordító a fejlődésben – 2 . rész : Válaszút előtt a világ vízgazdálkodása. *Hidrológiai Közlöny*, 98(4), 9–16. Retrieved from http://www.hidrologia.hu/mht/letoltes/HK2018_4_v1.pdf
- van der Kwast, J., Timmermans, W., Gieske, A., Su, Z., Oliso, A., Jia, L., ... de Jong, S. (2009). Evaluation of the Surface Energy Balance System (SEBS) applied to ASTER imagery with flux-measurements at the SPARC 2004 site (Barrax , Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1337–1347. Retrieved from www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/1337/2009/
- van der Velde, R., Su, Z., & Ma, Y. (2008). Impact of soil moisture dynamics on ASAR σ_0 signatures and its spatial variability observed over the Tibetan Plateau. *Sensors*, 8(9), 5479–5491. <https://doi.org/10.3390/s8095479>
- Vekerdy, Z. (1981). *A távérzékelés alkalmazása a hidrológiai térképezésben. M.Sc. thesis*. Eötvös University, Budapest, Hungary.
- Vekerdy, Z. (1996). *Geographical information system based hydrological modelling of alluvial regions using the example of the Kisalföld, Hungary. ITC publication Nr. 42*. Lorand Eötvös University, Budapest and ITC, Enschede, Budapest, Hungary.
- Vekerdy, Z., & Hutyán, R. (1990). A távérzékelés és a térinformatika vízügyi alkalmazásai. In *6th FÖLDFOTO congress*. Budapest, Hungary.
- Vinukollu, R. K., Wood, E. F., Ferguson, C. R., & Fisher, J. B. (2011). Remote Sensing of Environment Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches. *Remote Sensing of Environment*, 115(3), 801–823. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.006>

6 Az értekezés témájához tartozó további publikációim

6.1 SEBS és párolgás

- Abdelrady, A., Timmermans, J., Vekerdy, Z., & Salama, M. S. M. S. (2016). Surface energy balance of fresh and saline waters : AquaSEBS. *Remote Sensing*, 8(7), 583. <https://doi.org/10.3390/rs8070583>
- Aung, W. Y., Waltner, I., & Vekerdy, Z. (2018). Irrigation water requirements of rice in Myanmar. In G. Jakab, A. Tóth, & E. Csengeri (Eds.), *Alkalmazkodó vízgazdálkodás: lehetőségek és kockázatok - Víz tudományi Nemzetközi Konferencia* (pp. 283–288). Szarvas, Hungary: Szent István Egyetem.
- Beek, E., Bozorgy, B., Vekerdy, Z., & Meijer, K. (2008). Limits to agricultural growth in the Sistan Closed Inland Delta, Iran. *Irrigation and Drainage Systems*, 22(2), 131–143. <https://doi.org/10.1007/s10795-008-9045-7>
- Gokmen, M., van der Tol, C., Vekerdy, Z., Verhoef, W., Batelaan, O., & Sarikaya, H. Z. (2012). Towards an improved mapping of evapotranspiration in semi-arid regions. In C. M. U. Neale & M. H. Cosh (Eds.), *Remote Sensing and Hydrology, Proceedings of the 2010 Symposium held at Jackson Hole, Wyoming, 27-30 September 2010* (Vol. 352, pp. 149–153). Wallingford: IAHS. http://intranet.itc.nl/papers/2012/conf/gokmen_tow.pdf
- Jin, X., Guo, R., & Vekerdy, Z. (2015). Distribution of actual evapotranspiration over Yinchuan Plain, an arid area in China. In T. Jancsó & P. Engler (Eds.), *Integrated geo-spatial information technology and its application to resource and environmental management towards GEOSS* (Vol. 5, pp. 9–16). Székesfehérvár, Hungary: University of Western Hungary. <https://doi.org/10.3390/rs5126976>
- Meijerink, A. M. J., & Vekerdy, Z. (2003). Satellite images for the monitoring of wetlands and assessing their water budgets. In P. S. Roy (Ed.), *Geoinformatics for tropical ecosystems* (pp. 513–538). Dehra Dun, India: Bishen Singh Mahendra Pal Singh.
- Meijerink, A. M. J., Gieske, A. S. M., & Vekerdy, Z. (2005). Surface energy balance using satellite data for the water balance of a traditional irrigation—wetland system in SW Iran. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(1), 89–105. <https://doi.org/10.1007/s10795-005-4348-4>
- Móricz, N., Mátyás, C., Berki, I., Rasztoivits, E., Vekerdy, Z., & Gribovszki, Z. (2012). Egy erdő és parlagterület vízforgalmának összehasonlítása. *Hidrológiai Közlöny*, 92(1), 67–74.
- Móricz, N., Mátyás, C., Berki, I., Rasztoivits, E., Vekerdy, Z., & Gribovszki, Z. (2012). Comparative water balance study of forest and fallow plots. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 5(4), 188–196. <https://doi.org/10.3832/ifor0624-005>

6.2 Elöntés és felszínborítottság térképezés

- Al-Maliki, S., & Vekerdy, Z. (2020). Assess the Status of The Marshlands with Regards to Inundation Area and Vegetation Cover Using Remote Sensing Test Study: Al Hammar Marsh (Iraq). In G. Jakab & E. Csengeri (Eds.), *Water management : Focus on Climate Change - 3rd International Conference on Water Sciences* (pp. 144–149). Szarvas, Hungary: Szent István Egyetem.
- Bangira, T., Alfieri, S. M. S., Menenti, M., van Niekerk, A., & Vekerdy, Z. (2017). A Spectral Unmixing Method with Ensemble Estimation of Endmembers: Application to Flood Mapping in the Caprivi Floodplain. *Remote Sensing*, 9(10), 1013. <https://doi.org/10.3390/rs9101013>
- Chen, Y., Wang, X., Vekerdy, Z., Vatsava, R., Zheng, G., & Zhang, L. (2015). Monitoring Forest Dynamics (1988-2010) in Changting County Using Time Series of Remote Sensing Data. In T. Jancsó & P. Engler (Eds.), *Integrated geo-spatial information technology and its application to resource and environmental management towards GEOSS* (pp. 123–128). Székesfehérvár, Hungary: University of Western Hungary.
- Hargitai, H., Vekerdy, Z., Kardeván, P., & Turdukulov, U. (2004). Képalkotó spektrométeres kísérlet Magyarországon. *Térinformatika*, 2004/6, 12–16.
- Kollár, S., Vekerdy, Z., & Hahn, I. (2011). Hullámtéri élőhelyek kategorizálása távérzékelési és tematikus adatok alapján. *GIS Open Conference*. Székesfehérvár, Hungary.
- Kollár, S., Vekerdy, Z., & Márkus, B. (2011). Forest habitat change dynamics in a riparian wetland. In A. Stein, E. Pebesma, & G. Heuvelink (Eds.), *Spatial Statistics 2011 : Mapping Global Change* (Vol. 7, pp. 371–376). Enschede, the Netherlands.
- Kollár, S., Vekerdy, Z., & Márkus, B. (2015). Remote sensing analysis of riparian vegetation habitats. *International Journal of Geoinformatics*, 11(4), 63–67. <http://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/912/492>
- Kollár, Sz., Vekerdy, Z., & Márkus, B. (2013). The role of geostatistical measures in the classification of riparian vegetation - case study about a Hungarian floodplain. In N. X. Thinh (Ed.), *Modellierung und Simulation von Ökosystemen : Workshop Kölpinsee 2012* (pp. 227–236). Kölpinsee: Shaker Verlag.
- Licskó, B., & Vekerdy, Z. (1984). A távérzékelés módszereinek alkalmazása egy délkelet- magyarországi belvízöblözet feltárásában. In *Földfelszíni és meteorológiai megfigyelések a világűrből, 5. FÖLDFOTÓ kongresszus* (Vol. 1, pp. 98–106). Budapest, Hungary: Magyar Asztronautikai Társaság.
- Móricz, N., Garamszegi, B., Rasztovits, E., Bidló, A., Horváth, A., Jagicza, A., ... Gálos, B. (2018). Recent Drought-Induced Vitality Decline of Black Pine (*Pinus nigra* Arn.) in South-West Hungary—Is This Drought-Resistant Species under Threat by Climate Change? *Forests*, 9(7), 414. <https://doi.org/10.3390/f9070414>
- Vekerdy, Z., & Wang, T. (2016). Towards Automized Processing Chanes for

- Wetland Habitat Mapping. In *Living Planet Symposium* (p. Paper 1297). poster, Prague, Czech Republic: European Space Agency (ESA). Retrieved from http://lps16.esa.int/page_session187.php#1297p
- Vekerdy, Z., Fekete, B., & Koolhoven, W. (1990). Application of GIS and RS in the management of flatland reservoir. In *International Symposium on Remote Sensing and Water Resources* (pp. 815–823). Enschede, the Netherlands: International Association of Hydrogeologists & The Netherlands Society for Remote Sensing.

6.3 Mikrohullámú távérzékelés, talajnedvesség

- Dente, L., Vekerdy, Z., de Jeu, R., & Holmes, T. (2008). Passive and active microwave for soil moisture retrieval. *10th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment*. Florence, Italy. Retrieved from http://www.microrad2008.org/public/posters/poster_dente.pdf
- Dente, L., Vekerdy, Z., de Jeu, R., & Su, Z. (2013). Seasonality and autocorrelation of satellite-derived soil moisture products. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9–10), 3231–3247. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716923>
- Dente, L., Vekerdy, Z., Su, Z., & Ucer, M. (2011). Twente soil moisture and soil temperature monitoring network. Enschede: Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente. Retrieved from http://www.itc.nl/library/papers_2011/scie/dente_twe.pdf
- Dente, L., Vekerdy, Z., Wen, J., & Su, Z. (2012). Maqu network for validation of satellite-derived soil moisture products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17(1), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.11.004>
- Juhász, I., Csillag, F., & Vekerdy, Z. (1987). A talajnedvesség meghatározása távérzékeléssel. In *Távérzékelési alkalmazások conference* (pp. 178–187). Békéscsaba, Hungary.
- Tolner, L., Gál, E., Harkányiné Székely, Z., Waltner, I., Qiu, Y., Tolner, I. T., & Vekerdy, Z. (2017). Egy besenyőtelki tábla talajnedvességének monitorozása Sentinel műhold és helyszíni vizsgálatok segítségével. *Talajvédelem*, Különszám, 269–276.
- Worqlul, A., Ayana, E., Vekerdy, Z., Langan, S., & Steenhuis, T. S. (2016). Downscaling of SMOS soil moisture data using SEBS evaporative fraction, for the case of Mizewa watershed in Ethiopia and Remedhus watershed in Spain. In *Living Planet Symposium* (p. Paper 536). Poster, Prague, Czech Republic: European Space Agency (ESA). Retrieved from http://lps16.esa.int/page_session187.php#536p
- Zilahy, P., Juhász, I., & Vekerdy, Z. (1985). A talajnedvesség meghatározása távérzékeléssel (Soil moisture determination by remote sensing). *Melioráció - Öntözés És Tápanyaggazdálkodás*, 1, 16–22.

6.4 Adatintegráció, térinformatika, műholdas öko- és agrohidrologia

- Alkema, D., Bijker, W., Sharifi, A., Vekerdy, Z., & Verhoef, W. (2013). Data integration. In V. Tolpekin & A. Stein (Eds.), *The core of GIScience* (pp. 373–426). Enschede, the Netherlands: International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC).
- Fekete, B., & Vekerdy, Z. (1989). Információs rendszerek alkalmazása a mezőgazdasági vízgazdálkodásban. In *8th annual conference of the Hungarian Hydrological Society*. Nyíregyháza, Hungary.
- Fekete, B., Licskó, B., & Vekerdy, Z. (1989). A távérzékelés a vízgazdálkodás szolgálatában. *Magyar Vízgazdálkodás*, 29(4), 8–12.
- Gens, R., Vekerdy, Z., & Pohl, C. (1998). Image and data fusion - concept and implementation of a multimedia tutorial . In *Conference on Fusion of Earth Data* (pp. 217–222). Sophia Antipolis, France.
- Gokmen, M., Vekerdy, Z., Lubczynski, M. W., Timmermans, J., Batelaan, O., & Verhoef, W. (2012). Improving spatially distributed water balance quantification with RS-based evapotranspiration and precipitation at a large semi-arid basin scale. *Journal of Hydrometeorology*.
- Gokmen, M., Vekerdy, Z., Lubczynski, M. W., Timmermans, J., Batelaan, O., & Verhoef, W. (2013). Assessing groundwater storage changes using remote sensing-based evapotranspiration and precipitation at a large semiarid basin scale. *Journal of Hydrometeorology*, 14(6), 1733–1753. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0156.1>
- Gokmen, M., Vekerdy, Z., Verhoef, W., & Batelaan, O. (2013). Satellite-based analysis of recent trends in the ecohydrology of a semi-arid region. *Hydrology & Earth System Sciences*, 17(10), 6193–6235.
- Hársfalvai, M., Horváth, J., Kovács, A., Licskó, B., Pál, J., Szilágyi, A., & Vekerdy, Z. (1990). *Útmutató a távérzékelési módszerek alkalmazására a meliorációs kiviteli tervezésben*. Budapest, Hungary: FÖMI.
- Licskó, B., & Vekerdy, Z. (1985). A távérzékelés módszereinek alkalmazása a melioráció hatásának vizsgálatában. In *The role of land reclamation in the development in plant production, ICID Conference* (Vol. 1, pp. 505–512). Budapest, Hungary.
- Licskó, B., & Vekerdy, Z. (1988). Application of remote sensing procedures for planning and control of drainage constructions . In *15th European regional conference on agricultural water management* (pp. 175–188). Dubrovnik, Yugoslavia.
- Licskó, B., Morvay, K., & Vekerdy, Z. (1993). Application of remote sensing techniques at VITUKI between 1986-1990 . In *Remote sensing for monitoring the changing environment of Europe*, Winkler (ed.) (pp. 211–215). Rotterdam, The Netherlands: Balkema.
- Licskó, B., Vekerdy, Z., Szilágyi, A., & Busics, I. (1988). *Távérzékelési módszertani útmutató a meliorációs tanulmánytervek készítéséhez*. Budapest, Hungary: FÖMI.

- Raza, A., Vekerdy, Z., Aung, W. Y., & Lubangakene, D. (2018). Climate change assessment and its impact on evapotranspiration and irrigation requirement of major crops in District Faisalabad. In G. Jakab, A. Tóth, & E. Csengeri (Eds.), *Alkalmazkodó vízgazdálkodás: lehetőségek és kockázatok* (pp. 218–223). Szarvas, Hungary.
- Vekerdy, Z. (2020). Optikai és radar űr felvételek integrációja az agrohídroológiában – apró gondolatok – kiindulási pontok. In G. Kákonyi (Ed.), *Fény-Tér-Kép 2020. e-conference: GeoIQ*. Retrieved from <https://geoiq.hu/2020/11/11/feny-ter-kep-2020-program/>
- Vekerdy, Z., & Meijerink, A. M. J. (1995). The extension of one-dimensional process modelling results into two dimensions with an example of modelling hydrological processes for the Kisalföld region. *EN + IN International Conference on Environment and Informatics*. Budapest, Hungary.
- Vekerdy, Z., Wang, F., Zhang, J. M., & Prakash, A. (1999). Requirements for the integration of remote sensing and field data in a GIS for the management of fire fighting in coalfields. In *Second International Symposium on Operationalization of Remote Sensing* (pp. 1–6). Enschede, the Netherlands: International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC).
- Waltner, I., Vekerdy, Z., Azab, A. M., & Harkányiné Székely, Z. (2016). EO support to environmental services valuation. In *Living Planet Symposium (p. Paper 2243)*. poster, Prague, Czech Republic: European Space Agency (ESA). Retrieved from http://lps16.esa.int/page_session187.php#2243p